

Hormigón de alta densidad con escoria de cobre para atenuar la radiación ionizante

High density concrete with copper slag to attenuate ionizing radiation

Dr. Carlos Magno Chavarry Vallejos¹; Dr. (c) Liliana Janet Chavarría Reyes²;
Dr. Xavier Antonio Laos Laura³; Dr. Andrés Avelino Valencia Gutiérrez⁴;
Ing. Josué Giordán Baldoceda Pérez⁵; Ing. Daniel Enrique Vega Romero⁶
{carlos.chavarry@upc.pe; liliana.chavarria@upc.pe;
xavier.laos@upc.pe; avalenciag@usmp.pe;
josue.1919bp@gmail.com; vegaromerodaniel@gmail.com}

Fecha de recepción: 7 de enero de 2020 — **Fecha de aceptación:** 8 de febrero de 2020

Resumen: Se estudia el hormigón de alta densidad reforzado con escoria de cobre como parte del agregado fino para mejorar sus propiedades mecánicas y obtener barreras protectoras para atenuar las radiaciones ionizantes hasta niveles aceptables, así como una mezcla con mayor trabajabilidad y homogeneidad. El método empleado fue el deductivo con orientación aplicada y enfoque cuantitativo. El instrumento de recolección de datos fue retrolectivo, descriptivo, correlacional y explicativo. El diseño fue el experimental, longitudinal, prospectivo y el estudio de cohorte (causa-efecto). Se diseña un hormigón con patrón de resistencia $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, con 5 tipos de mezclas adicionales para ser comparados con la mezcla patrón, con diferentes porcentajes de la escoria de cobre (15%, 30%, 50%, 80% y 100%) como sustitución parcial del agregado fino. La muestra conformada por 144 probetas con medidas 20cmx10cm, para los ensayos de resistencia a la compresión y tracción a edades son de 3, 7, 14 y 28 días. También se elaboró 18 placas con medidas de 20cmx20cm de espesores variables (1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm), para realizar los ensayos de radiación directa-dosimetría exponiéndolos a una intensidad constante de rayos X. El estudio determinó que a medida que se aumenta la dosificación del porcentaje de escoria de cobre aumenta la densidad del hormigón; la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción se incrementan hasta la incorporación de un 30% de escoria de cobre, después de ese porcentaje las resistencias disminuyen gradualmente. En la atenuación de las radiaciones ionizantes se observó que a mayor porcentaje de escoria de cobre mejoran

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.

²Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.

³Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.

⁴Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.

⁵Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

⁶Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Cómo citar:

Chavarry Vallejos, C., Chavarría Reyes, L., Laos Laura, X., Valencia Gutiérrez, A., Baldoceda Pérez, J., & Vega Romero, D. (2020). Hormigón de alta densidad con escoria de cobre para atenuar la radiación ionizante. Pro Sciences, 4(31), 42-55. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol4iss31.2020pp42-55>

las barreras protectoras brindando una mayor protección radiológica. El estudio determinó que la propuesta del diseño óptimo consiste en la dosificación de 50% de escoria de cobre y 50% de agregado fino, con un espesor de losa de 2.5 cm, grado de homogeneidad de 2.51%, porcentaje de atenuación de radiación ionizante 93.28%, densidad 2699.27 kg/m³, resistencia a la compresión 376.70 kg/cm² y a la tracción de 30.13 kg/m³.

Palabras clave — Diseño de hormigón, escoria de cobre, densidad del hormigón, resistencia del hormigón, atenuación a la radiación ionizante.

Abstract: High density concrete reinforced with copper slag is studied as part of the fine aggregate to improve its mechanical properties and obtain protective barriers to attenuate ionizing radiation to acceptable levels, as well as a mixture with greater workability and homogeneity. The method used was the deductive with applied guidance and quantitative approach. The data collection instrument was retrolective, descriptive, correlational and explanatory. The design was the experimental, longitudinal, prospective and cohort study (cause-effect). A concrete with resistance pattern $f'c = 210 \text{ kg / cm}^2$ is designed, with 5 types of additional mixtures to be compared with the standard mixture, with different percentages of copper slag (15%, 30%, 50%, 80 % and 100%) as partial replacement of the fine aggregate. The sample consists of 144 specimens with measures 20cmx10cm, for tests of resistance to compression and tensile at ages are 3, 7, 14 and 28 days. 18 plates were also made with measures of 20cm x 20cm of variable thicknesses (1.5 cm, 2 cm, 2.5 cm), to perform direct radiation-dosimetry tests exposing them to a constant intensity of X-rays. The study determined that as it increases the dosage of the percentage of copper slag increases the density of the concrete; The compressive strength and tensile strength are increased until the incorporation of 30% copper slag, after that percentage the resistance decreases gradually. In the attenuation of the ionizing radiations it was observed that the higher the percentage of copper slag, the protective barriers improve, providing greater radiological protection. The study determined that the optimal design proposal consists of the dosage of 50% copper slag and 50% fine aggregate, with a slab thickness of 2.5 cm, homogeneity degree of 2.51%, percentage of attenuation of ionizing radiation 93.28 %, density 2699.27 kg/m³, resistance to understanding 376.70 kg/cm² and tensile strength of 30.13 kg/m³.

Keywords — Concrete design, copper slag, concrete density, concrete resistance, attenuation to ionizing radiation.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de disminuir los riesgos que ocasionan a las personas expuestas a fuentes emisoras de radiación, es el motivo principal de la elaboración del presente artículo, que busca incorporar la escoria de cobre como parte del agregado fino de la mezcla del hormigón. Gonzales (2010), sostiene que la protección al público, trabajadores y estudiantes que se encuentran en los alrededores de la sala de rayos X para diagnóstico médico se da empleando un blindaje o barrera de protección para limitar la exposición de la radiación. Los procesos para la elaboración del hormigón especial o de alta densidad mediante diferentes dosificaciones, está basado en que a mayor peso unitario se logra maximizar la atenuación ante las radiaciones ionizantes, teniendo como medidas una reducción de las transmisiones de estos rayos. Las transmisiones radioactivas siempre han sido cuestionadas por inducir una serie de riesgos a la salud pública a nivel mundial, como consecuencia indirecta de las prácticas médicas, procesos de energía nuclear u otras industrias que presenten similares fuentes de emisión. Este riesgo es un indicador a tomar en cuenta para la elaboración de estructuras de hormigón armado en los ambientes expuestos a la radiación, debiendo mejorar su función de blindaje.

El prototipo de blindaje radiológico se realizó para dar una solución rentable, durable y eficiente en la atenuación de los rayos ionizantes en áreas como las industrias, plantas de energía, hospitales, entre otros.

Mavroulidou (2017), define al material residual escorias de cobre como un desecho voluminoso obtenido durante la fabricación de cobre y que a medida que su eliminación se convierta en una preocupación para los organismos de protección del medio ambiente y los gobiernos, se necesitan posibles salidas alternativas para la utilización de este material de desecho. Sobre la base de los resultados del estudio, las escorias de cobre refrigeradas por agua pueden considerarse como un agregado fino adecuado para el hormigón, se plantea un uso determinado de protección radiológica, dado su bajo costo y alta producción, durabilidad y adecuada resistencia a la compresión del hormigón para estructuras que tienen como función blindar, aislar o reducir las emisiones de radiación ionizantes como ocurre en los centros de salud donde las personas se movilizan en ambientes expuestos a radiación, como por ejemplo estructuras de centrales nucleares, laboratorios de biotecnología, departamento de rayos X, entre otros. Un diseño de hormigón de alta densidad empleando como materia prima la roca de baritina, cuya característica es su elevada densidad; permite atenuar el paso de los rayos ionizantes. Para probarlo Miñano y Patiño (2015), analizaron las características físicas del mineral de bario, para hallar el porcentaje de humedad, absorción, granulometría y densidad del agregado, se determinó la existencia de una atenuación considerablemente mayor a los rayos ionizantes, debido a que se está empleando agregados de bario tanto arena gruesa como fina; también que la roca de bario, además de pasar la prueba de abrasión de Los Ángeles, se obtuvo una resistencia de $f'c=331.65 \text{ kg/cm}^2$, para un diseño $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, a los 28 días.

Amaya (2013), menciona que en el Perú país productor de cobre con un 12% de la producción mundial, las principales fundiciones nacionales como Southern, registran una producción del cobre blíster de 1,020 a 1,200 toneladas por día con una generación de 378 a 450 toneladas de escoria”, representando un porcentaje aproximado de 33.30% respecto al cobre neto y que es acumulado en depósitos naturales. Por esta razón las industrias metalúrgicas en el Perú afrontan una serie de cuestionamientos por consecuencia de las pérdidas económicas y problemas legales generada por daños ambientales debido al mal uso y eliminación de sus desechos por la falta de información teórica y experimental sobre las propiedades físicas y mecánicas aceptadas por las normativas y/o protocolos de calidad. La utilización de los residuos sólidos es el reto para los ingenieros civiles y ambientales de utilizar los residuos de diferentes industrias para el desarrollo sostenible, Murari, Siddique, y Jain (2015), manifiestan que el uso de escorias de cobre para la producción del cemento y hormigón proporcionan beneficios ambientales y económicos potenciales para todas las industrias relacionadas, especialmente en zonas donde se produce una cantidad considerable de escorias de cobre.

Según, Guo, Zhu, Pan, y Zhang (2016), sostienen que el empleo de una nueva tecnología para mejorar las características de los componentes de cobre y hierro, permitirán conocer con mayor profundidad las soluciones para el diseño de hormigón de alta densidad en donde se desea atenuar la transmisión de las radiaciones hacia los seres humanos. Un hormigón pesado tiene como función principal ser un blindaje frente a ondas radiactivas, porque está compuesto por áridos de alto peso específico provenientes de los materiales o metales (Pérez 2004). La utilización de los desechos de las industrias metalúrgicas como insumos para la elaboración de un hormigón de alta densidad, brinda un valor importante en términos económicos y en la protección del medio ambiente, reduciendo el impacto ambiental generada por las industrias metalúrgicas, aprovechando de esta manera los productos residuales.

METODOLOGÍA

El método del estudio es el deductivo, debido a que demuestra con bases teóricas un contexto específicamente para el blindaje de hormigón, manipulando un material de residuo mineral como la escoria de cobre (EC) para aumentar la densidad y mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, es de orientación aplicada, ya que permite dar solución al problema que es la transmisión de radiación ionizantes, enfoque cuantitativo, porque determina el porcentaje óptimo de escoria de cobre, la densidad de los agregados, resistencias, evaluar la durabilidad, la capacidad de blindaje del hormigón, el instrumento de recolección de datos retrolectivo porque se utilizarán formatos y fichas del laboratorio de materiales de la Universidad Ricardo Palma. El tipo del estudio es el descriptivo, correlacional y explicativo, porque explica e identifica el problema y busca la relación entre las variables hormigón de alta densidad y el porcentaje de escoria de cobre. El nivel del estudio es el descriptivo, dado a que determina el porcentaje de escoria de cobre e identifica los parámetros que intervienen en la dosificación del hormigón. El diseño es experimental, longitudinal y prospectiva, ya que se va incorporar diferentes porcentajes de escoria de cobre para disponerla a ensayos y evaluar los resultados de la resistencia, la calidad durabilidad y blindaje del hormigón. El estudio del diseño es de cohorte porque se presenta la causa y efecto que sufre el hormigón al manipular un elemento dentro de ella como el agregado fino.

El diseño que empleó Álvarez, L. (2010), en su estudio fue el experimental con base a especificaciones y procedimientos indicados por las normas de la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales (por sus siglas en inglés ASTM), aplicables tanto para la grava como para la arena, haciendo énfasis en el agregado fino y caracterizando sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Mavroulidou (2017), diseñó un hormigón con material residual de escorias de cobre para un reemplazo parcial o total del agregado de hormigón fino. Realizó una serie de pruebas con dos relaciones agua a cemento diferente, para determinar la viabilidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo estático de elasticidad y una serie de características relacionadas con la durabilidad (absorción de agua, corrosión acelerada, carbonatación, álcali-sílice reacción).

Cendoya (2009), definió a las escorias de cobre como un producto de la industria de fundición de cobre. Tomó escorias de cobre granuladas y la fresó hasta que adquirió características similares a las de un agregado fino, que luego fue incorporado al hormigón, en combinación con arena de río en proporciones de 25%, 40% y 50% en volumen de escorias de cobre. Se examinó el impacto de las diferentes combinaciones en el comportamiento mecánico de flexotracción y compresión en el hormigón resultante. La especificación fue producir hormigón para relaciones agua-cemento de 0.45 y 0.52 asociadas a resistencias de rotura a flexotracción de 3.6 y 4.3 MPa, respectivamente. Se midió la trabajabilidad del hormigón fresco, así como la densidad y la carga de rotura por flexotracción y compresión en el hormigón endurecido, comparando los resultados con un patrón de hormigón que no contenía escorias de cobre fundidor.

Alayón y Álvarez (2008), menciona que, para obtener hormigón pesado, se sustituyó parte del agregado fino por mineral de hierro, el cual se encuentra en la naturaleza formando Hematita Fe_2O_3 . Para realizar el diseño de mezcla, se sustituyó proporcionalmente el 30, 40 y 50% del volumen total de la arena por mineral. La piedra utilizada tenía tamaño máximo de $1\frac{1}{2}$ ". Se calcularon para estas mezclas, valores numéricos de asentamiento, resistencia, peso unitario y módulo de elasticidad, los cuales fueron comparados con los obtenidos en una mezcla de hormigón normal elaborada con los mismos materiales empleados para dosificar el hormigón pesado.

Población y muestra

Población: Se consideró una población de 144 probetas y 18 placas de testigo de hormigón, teniendo como laboratorio de materiales la Universidad Ricardo Palma para los ensayos, así como también la sala de radiodiagnóstico del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas para el ensayo de dosimetría en las placas.

Diseño muestra: Las dosificaciones del hormigón con diferentes porcentajes de escoria cobre (0% EC, 15% EC, 30% EC, 50 % E, 80% EC y 100% EC) para diferentes edades de prueba (3, 7, 14 y 28 días) se realizaron los ensayos de resistencia (72 muestra a la compresión y 72 muestras a la tracción), así como de radiación (18 muestras de irradiación directa y homogeneidad de mezcla).

Variables

Variables independientes (Porcentaje de escoria de cobre):

Cantidad de material a utilizar en la composición del hormigón que son el agregado fino, agregado grueso, agua y cemento. En el agregado fino se sustituirá el material de la escoria de cobre dependiendo de la dosificación que se deba realizar.

Variable dependiente (Hormigón de alta densidad):

Relación de la masa y volumen del hormigón endurecido que ocupa como testigo para los ensayos de resistencia y radiación. Resistencia del hormigón pesado reforzado con escoria de cobre, la capacidad que tiene el hormigón pesado para soportar al estar sometido a un ensayo de compresión axial. La atenuación de la radiación ionizante son las pruebas dosimétricas realizadas al hormigón prototipo desde una fuente radioactiva para una evaluación radiológica no destructiva al hormigón, en este caso placas, para medir mediante porcentajes la atenuación de las radiaciones ionizantes que ejerce el espesor de la misma, para su posterior análisis y resultados de la investigación.

Presentación y análisis de resultados

Ensayo de irradiación directa por rayos X: Las placas se ensayaron en los laboratorios de radiodiagnóstico en el Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN). Se utilizó el equipo de rayos X con las siguientes características.



Figura 1. Máquina de rayos X Fuente: INEN

Elaborado por: los autores

En primer término, se agruparon las placas según dosificación para ser ensayadas. Se alistó la máquina de rayos X (Figura 1) colocándola con el control remoto en forma vertical para una medida más rápida, cómoda y exacta. Se colocó la mesa de vidrio para ser usada como superficie y se instalaron todos los instrumentos necesarios para llevar a cabo el ensayo radiológico como lo son una computadora portátil con software de dosimetría y directamente configurada con la máquina de radiación. Acto seguido se midió la intensidad directa sin la presencia de placa intermedia (espesor=0 cm) para tener tal lectura inicial como referencia a las medidas posteriores. Asimismo, se colocó dos barras de tecnopor para ser usadas como soporte de las placas ya que este no altera el resultado ni absorbe las ondas de rayos X emitidas. Bajo la placa y sobre la mesa se colocó un dosímetro o lector de radiación ionizante, cabe mencionar que estos valores son mínimos en comparación con las maquinarias que operan en el laboratorio de Radioterapia. Sin embargo, se tomaron todas las medidas necesarias para que no haya ningún incidente relacionado con la salud. Siguiendo con el procedimiento se ensayó las placas de hormigón patrón (0% EC) obteniendo un valor de atenuación elevado. Se fueron colocando las placas de diferente espesor y con diferentes dosificaciones de escoria de cobre para medir la atenuación de radiación ionizante.

Ensayo de homogeneidad por escala de grises: En este ensayo se midió la precisión de la homogeneidad de la mezcla de hormigón al aplicar radiación sobre las placas con diferentes dosificaciones de escoria de cobre. Para este fin, se analizaron 5 puntos más representativos sobre la superficie de las placas de 1.5 cm de espesor (figura 2), una vez finalizadas las tomas radiográficas, y con estos valores se analizó la transmisión en cada punto para calcular la discrepancia entre ellos.

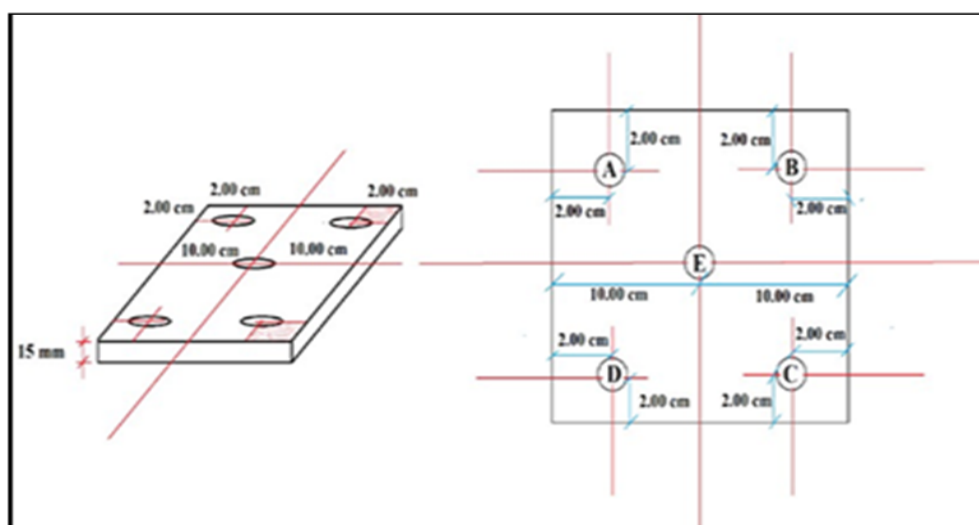


Figura 2. Puntos representativos de placa de hormigón para las pruebas radiográficas

Elaborado por: los autores

Una vez obtenida la radiografía de cada placa se ubicó un punto de cada vértice midiendo 2cm x 2cm desde el borde y uno central por la que con ayuda de un programa especializado se determinó los valores promedio y desviaciones estándar de cada punto. Se obtiene una desviación estándar “S” y valores promedio “X” de pixeles, se calcula el error estándar (Sm) de la media muestral, valores necesarios para el cálculo del coeficiente de variación.

Peso unitario compactado del hormigón (PUC)

El peso unitario del hormigón es afectado por la adición de la escoria de cobre, como se observa que patrón (ver figura 3).

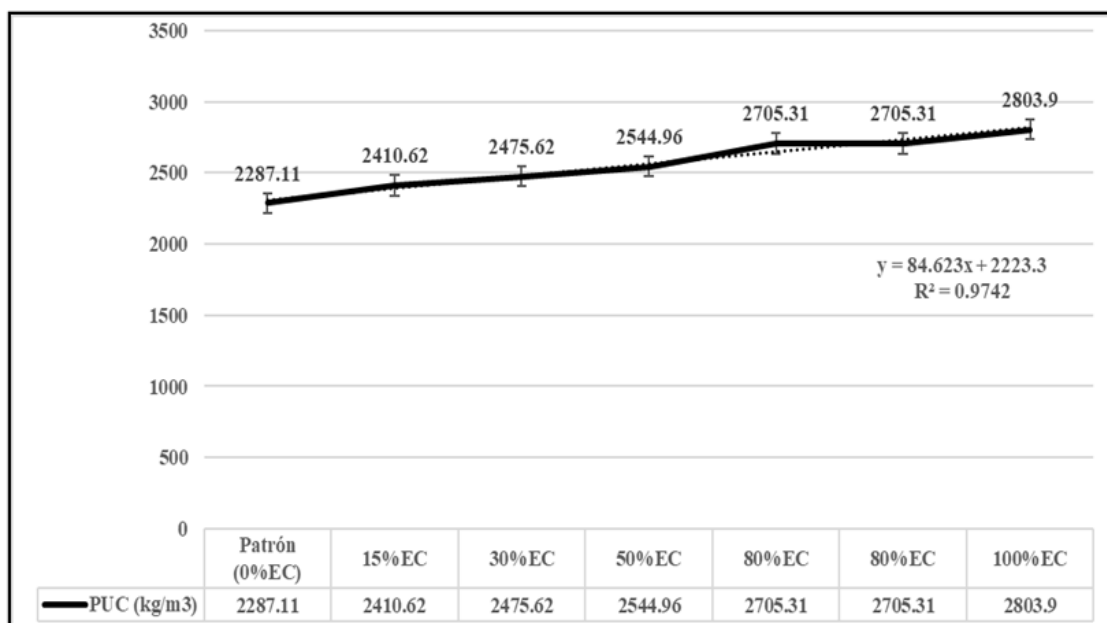


Figura 3. Peso unitario compactado del hormigón fresco, para diferentes dosificaciones de escoria de cobre

Elaborado por: los autores

Se observa que a medida que se añade mayor escoria de cobre con respecto al agregado fino se aumenta el peso unitario compactado y por consiguiente se aumenta la densidad del hormigón.

Resultados de exposición de fuentes ionizantes

Después de ensayadas todas las placas se realizó un cuadro de control donde se promediaron las tres medidas de dosis tomadas por el dosímetro para cada espesor comparándola con la medida inicial de espesor cero (sin placa intermedia). Así mismo se comparó también el porcentaje de transmisión dividiendo la dosis promedio entre la dosis inicial, tomando 100% como valor referencial la dosis inicial para cada espesor. Con estos valores se realizó los diagramas de atenuación donde intervienen la dosis de transmisión (%) y el espesor de cada dosificación para visualizar la curva de transmisión para cada caso obteniéndose por consiguiente la atenuación real.

Teniendo en cuenta la Calidad de Haz del Rayo X previamente a irradiar las placas de concreto: Tensión=125 Kv, Intensidad de corriente=125 mA-0.38mAs, Energía Efectiva=40 KeV, Filtración total= 3.4 mm-AI. La información obtenida permite comparar los resultados experimentales, simulados y publicados del valor de coeficiente de atenuación lineal y HVL de las dosificaciones y espesores utilizados en el método experimental de irradiación lineal se obtuvo un HVL (cm): 0.6425, 0.6203, 0.5944, 0.5712, 0.4699, 0.4317, para cada una de las dosificaciones 0% EC, 15% EC, 30% EC, 50 % E, 80% EC y 100% EC, respectivamente.

En la teoría de blindaje de radiación suele usarse el término de la capa Hemirreductora o HVL (*Half Value Layer*) que es el espesor (cm) de material que atenúa un Haz a la mitad de su intensidad y que será necesario tener en cuenta. En la tabla 1 se muestran los espesores de HVL que atenúan la mitad de la intensidad inicial de 367.33 uGy (muestra patrón Do). Calderón (2019), indica que la primera capa hemirreductora 1°HVL es definida como el espesor de un material específico que atenúa la intensidad del haz de radiación a la mitad del valor inicial y la 2°HVL atenúa el haz a un cuarto de intensidad. La razón entre 1°HVL y 2°HVL se conoce como el coeficiente de homogeneidad. Este coeficiente expresa la característica de composición de energías del haz en espectrometría, pues cuanto más se acerca a 1 (uno) su valor, significa que más homogéneo. Por ejemplo, para la muestra

con 50%E.C.-50%A.F. (propuesta de la investigación), se tomaron 3 datos de irradiación D(mGy) lanzada por los Rayos X, haciendo relación con la intensidad inicial como se presenta en la tabla 1:

Tabla 1. Cuadro de dispersión de los valores de ensayos de radiación del hormigón con 50%E.C.-50%A.F. en diferentes espesores

Espesor (cm)	D(mGy)			Transmisión (D/Do) %	Transmisión (D/Do) %	Atenuación (%)
0 (Do)	366.60	370.00	365.40	367.33	100.00%	0.00%
1.50	58.94	59.01	58.84	58.93	16.04%	83.96%
2.00	34.95	34.61	34.34	34.63	9.43%	90.57%
2.50	24.65	24.64	24.75	24.68	6.72%	93.28%

Elaborado por: los autores

Como el valor de la atenuación es 93.29% (el más cercano a uno), para una mezcla con 50%E.C.-50%A.F., significa que el diseño del hormigón es más homogéneo. En la figura 4, se observa que a mayor espesor de la losa menor es la atenuación.

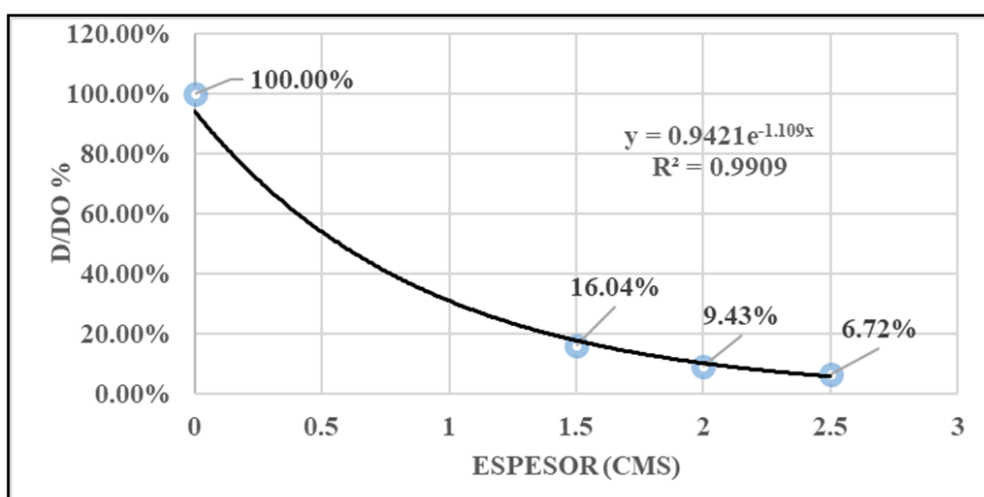


Figura 4. Diagrama de dosis Aplicada (D/Do%) vs espesor de placa para el hormigón con 50%EC.

Elaborado por: los autores

RESULTADOS

En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de la presente investigación a partir de los diferentes ensayos realizados.

Tabla 2. Presentación de resultados

Objetivos Específicos	Resultados de ensayos							Indicador
1. Determinar la dosificación óptima de la mezcla del hormigón sustituyendo parte del agregado fino por la escoria de cobre para aumentar la densidad del hormigón.	Densidad(kg/m3)							Densidad - Peso Unitario (Kg/m3)
	Muestra	C. Patrón	15%EC- 85%AF	30%EC- 70%AF	50%EC- 50%AF	80%EC- 20%AF	100%EC- 0%AF	
	PU	2521.01	2597.41	2661.07	2699.27	2724.73	2820.23	Asentamiento - Slump (Pulgadas)
	Asentamiento del hormigón							
	Muestra	C. Patrón	15%EC- 85%AF	30%EC- 70%AF	50%EC- 50%AF	80%EC- 20%AF	100%EC- 0%AF	
	Slump	3.2	3.5	4.2	4.4	4.5	5.5	
2. Determinar la dosificación óptima de la mezcla del hormigón sustituyendo parte del agregado fino por la escoria de cobre para aumentar la resistencia del hormigón.	Resistencia a la Compresión (Kg/cm²)							Resistencia del hormigón (Kg/cm2)
	Edad	C. Patrón	15%EC- 85%AF	30%EC- 70%AF	50%EC- 50%AF	80%EC- 20%AF	100%EC- 0%AF	
	3 días	217.60	235.50	240.00	241.30	220.20	219.40	
	7días	230.40	278.70	291.40	287.10	255.20	243.50	
	14 días	256.20	311.50	324.90	315.30	272.20	261.20	
	28 días	298.00	347.30	387.60	376.70	314.80	291.30	
	Resistencia a la Tracción (Kg/cm²)							
	Edad	C. Patrón	15%EC- 85%AF	30%EC- 70%AF	50%EC- 50%AF	80%EC- 20%AF	100%EC- 0%AF	
	3 días	17.40	18.80	20.33	19.37	17.57	17.97	
	7días	18.43	22.27	24.53	22.97	20.47	20.20	
	14 días	20.57	24.90	26.37	25.20	21.80	21.30	
	28 días	23.83	27.83	32.47	30.13	25.27	24.60	
3. Determinar la dosificación optima de la mezcla del hormigón sustituyendo parte del agregado fino por la escoria de cobre para aumentar la atenuación de la radiación ionizante.	Porcentaje de Atenuación de radiación ionizante							Porcentaje de Atenuación (%)
	Espesores	Hormigón Patrón	15%EC - 85%AF	30%EC - 70%AF	50%EC - 50%AF	80%EC- 20%AF	100%EC- 0%AF	
	15 mm	81.30%	81.47%	83.26%	83.96%	89.87%	90.02%	
	20mm	87.25%	89.09%	89.280%	90.57%	91.75%	95.38%	
	2.5mm	90.04%	92.80%	93.02%	93.28%	95.36%	96.32%	
	Grado de Homogeneidad (CV)							Grado de Homogeneidad (%) (Muy buena) homogeneidad)
	Muestra	Hormigón Patrón	15%EC - 85%AF	30%EC - 70%AF	50%EC - 50%AF	80%EC- 20%AF	100%EC- 0%AF	
	CV	0.42%	4.38%	4.64%	2.51%	3.70%	6.64%	

Elaborado por: los autores

Interpretación de resultados de la densidad del hormigón

Al añadir mayor porcentaje de escoria de cobre al agregado fino aumenta la densidad del hormigón, esto es debido a que la escoria de cobre como agregado tiene un peso específico de 3410 kg/m³, mientras que el hormigón patrón tiene una densidad de 2560 kg/m³. También aumenta el asentamiento ya que la escoria de cobre tiene muy poca capacidad de absorción (0.09%) y permeabilidad, mientras que el agregado fino tiene mayor capacidad de absorción (0.94%) y permeabilidad. Estos componentes aumentan la trabajabilidad y fluidez del hormigón fresco. Al desmoldar las probetas la densidad teórica se observa (tabla 2) que a medida que se añade la escoria de cobre en diferentes porcentajes la densidad se incrementa alcanzando su máximo cuando se le incorpora el cien por ciento de escoria de cobre con cero por ciento de agregado fino (100%EC-0%AF).

Interpretación de resultados del asentamiento del hormigón

Respecto al asentamiento se concluye que a mayor porcentaje de escoria de cobre sustituido al agregado fino existe un mayor asentamiento (slump) en la mezcla, ya que la escoria de cobre no posee mayores propiedades de absorción como la arena gruesa, teniendo la escoria de cobre una absorción de %Abs=0.09%, y el agregado fino %Abs=0.94%. Así pues, se obtuvo los valores del asentamiento del hormigón con escoria de cobre mayores al asentamiento del hormigón patrón siendo estos 3.5", 4.2", 4.4", 4.5" y 5.5" para los porcentajes de 15% E.C., 30% E.C., 50% E.C., 80% E.C. y 100% E.C. respectivamente, mientras que el asentamiento de hormigón patrón tuvo un valor de 3.2". Estos resultados representan un aumento de asentamiento, pero manteniéndose en el rango de trabajabilidad (3"-5"), hasta el porcentaje de 80% E.C., pues en la mezcla con 100%E.C. se obtiene un valor fuera del rango establecido (5.5") concluyendo que la mayor trabajabilidad por consistencia plástica se obtuvo con la dosificación del 80% de escoria de cobre. Se observa en la tabla 2, que a mayor cantidad de escoria de cobre existe un mayor asentamiento (slump) en la mezcla.

Interpretación de resultados de resistencia de hormigón

Resistencia a la compresión: Se obtuvo como resultado la resistencia a la compresión del hormigón patrón a los 28 días un $f'_c=298 \text{ kg/cm}^2$. Cuando se incorporó el 100% escoria de cobre dio un $f'_c=291.6 \text{ kg/cm}^2$, disminuye 2.25% respecto al patrón a los 28 días. La mayor resistencia se encontró con la dosificación 30%EC-70%AF, aumentando en un 30.10% la resistencia a la compresión respecto al hormigón patrón como se muestra en la tabla 2.

Resistencia a la tracción: Los valores obtenidos muestran que a medida que el porcentaje de escoria de cobre aumenta en la mezcla hay un aumento significativo en la resistencia a la tracción del hormigón prototipo hasta un punto máximo cuando se le incorpora un 30% de escoria de cobre en donde empieza a disminuir sus valores a mayor porcentaje de escoria de cobre. En la tabla (2) se muestra el comportamiento de la resistencia a la tracción a los 28 días del hormigón patrón añadiendo la escoria de cobre en diferentes dosificaciones. El f'_c promedio desarrollado a los 28 días por el hormigón con escoria de cobre en 30% es de $f'_c=32.4 \text{ kg/cm}^2$, y representa el 135.91% respecto a la resistencia alcanzada por el hormigón patrón $f'_c=23.84 \text{ kg/cm}^2$.

Interpretación de resultados de atenuación de la radiación

Los resultados obtenidos por su espesor siendo la dosificación que tiene mayor porcentaje de atenuación el de 100%EC-0%AF con un espesor de 2.5 cm que obtuvo un valor de 96.32% respecto al 90.04% grado de atenuación de rayos x teniendo un aumento de 6.97% respectivamente. Asimismo, las dosificaciones de porcentajes de 15%, 30%, 50% y 80% de escoria de cobre también

resultaron con menor porcentaje de transmisión que el hormigón patrón, siendo estos de 7.20%, 6.98%, 6.72%, y 4.64% respectivamente como consecuencia de la disminución de la intensidad incidente de los rayos x.

Resultados del ensayo de homogeneidad

La homogeneidad de los 5 puntos por cada placa analizada a través del valor del coeficiente de variación cumplió con una distribución homogénea de sus componentes (agregados) en el momento del vaciado. Revuelta, Carballosa y García-Calvo (2015), manifiestan que la eficacia de todos los criterios posee una fuerte dependencia respecto a la homogeneidad en hormigones de $f'c$ solicitada hasta los 500 kg/cm² y es especialmente significativa a partir de coeficientes de variación del 7%-8%. En el caso de hormigones de alta resistencia, la eficacia de los criterios está asegurada prácticamente sólo para instalaciones que aseguren una buena homogeneidad, en torno a $\delta=5\%$. La probabilidad de rechazo es algo superior cuando se aplican los criterios de identificación de la Instrucción de hormigón estructural (EHE-08), pero se mantiene en valores razonablemente bajos, por debajo del 6 %. La muestra patrón de resistencia $f'c=210$ kg/cm², del presente estudio el coeficiente de variación (CV) para una muestra al 100% E.C.-0%A.F.=6.64% (buena homogeneidad).

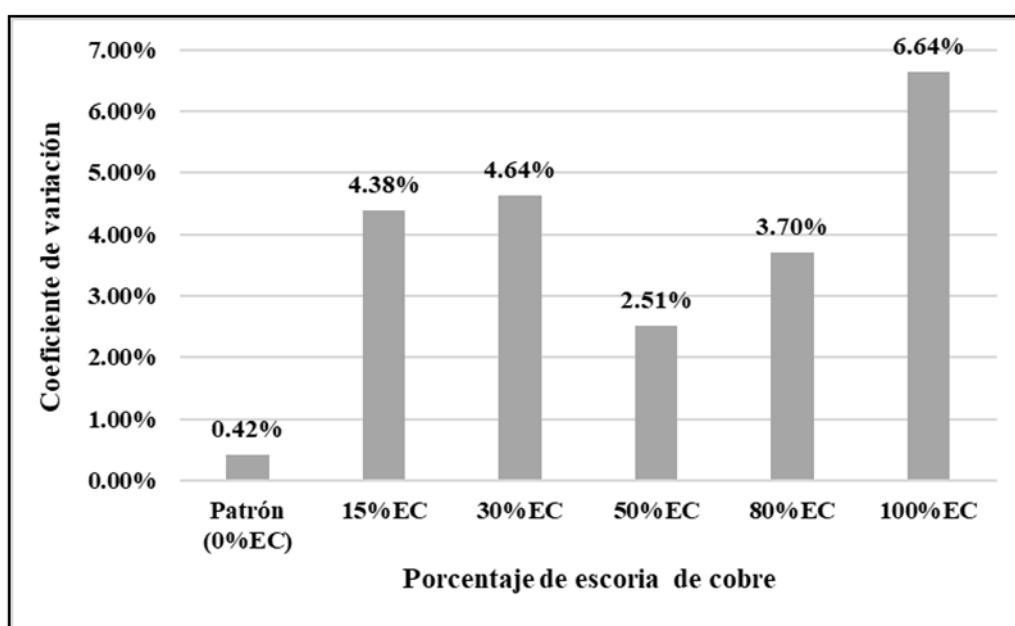


Figura 6. Porcentaje de escoria de cobre versus el coeficiente de variación

Elaborado por: los autores

DISCUSIÓN

Alayón y Álvarez (2008), desarrollaron ensayos de resistencia a la compresión axial a los 28 días, donde obtuvieron las resistencias $f'c= 273.51$, 281.93 y 300.10 kg/cm² para mezclas con 30, 40 y 50% de Hematita Fe₂O₃ (mineral de hierro) respectivamente. Además, la resistencia de diseño fue de 250 kg/cm², y la alcanzada por el hormigón convencional de $f'c=282.74$ kg/cm², el mismo comportamiento se presentó en la investigación de Kiran y Autade (2016), cuando sustituyó en forma parcial la arena con escoria del cobre hasta el 50% aumentando en un 44.63% respecto a la mezcla patrón. Estos resultados confirman la resistencia con respecto a la sustitución parcial de la escoria de cobre ya que al llegar al 30%EC se obtuvieron resistencias de $f'c=387.6$ kg/cm² y $f'c=32.47$ kg/

cm², teniendo un aumento significativo de 30.1% y 36.3% con respecto al hormigón patrón para la compresión y tracción respectivamente.

Con respecto a la densidad en el estudio de Cendoya (2009), determinada una proporción de escoria de cobre genera un incremento proporcional en su densidad, alcanzando valores superiores a los 2600 kg/m³ cuando se utiliza un 50% de EC, lo anterior se atribuye al alto peso específico que presenta la escoria lo cual genera un aumento de la densidad media progresivamente, para Shen, Zhang, Cheng, y Chen, Q. (2019), el resultado de la inclusión de áridos de alta densidad se refleja en hormigones de densidades superiores a los 4000 kg/m³ según el árido utilizado, que es bueno para un diseño de cualquier estructura de blindaje, se deben realizar los correspondientes ensayos de laboratorio para determinar su propio coeficiente de absorción, lo mismo ocurrió en el estudio de Alayón y Álvarez (2008), dado que el promedio de las densidades de la muestra patrón estuvo en 2373 Kg/m³, y las elaboradas con hematita, se ubicaron entre 2521 y 2655 kg/m³, para el presente estudio también presentó aumentos a medida que se incrementaba el porcentaje de la escoria de cobre llegando a una densidad de 2820.23 kg/m³, usando el 100%EC. Gonzales (2010), Utilizó un equipo de rayos X con una diferencia de potencial de 100 kV, una cámara de ionización que calcule la cantidad de rayos X que atraviesan las placas de hormigón y mortero con baritina. Los resultados demuestran que los valores obtenidos, para el cálculo de espesores de hormigón normal respecto del ensayo experimental son muy parecidos, existiendo una variación de 1.5 cm. Reemplazando el hormigón normal con una densidad 2440 kg/cm³ por el mortero con baritina, la densidad aumenta en 3200-3300 kg/m³.

Según Miñano y Patiño (2015) manifiesta que sí existe una atenuación considerablemente mayor a los rayos ionizantes al aumentar el porcentaje de bario en el hormigón, teniendo un valor de hasta 96.72%. En lo que respecta la presente estudio afirmamos que a mayor porcentaje de escoria de cobre aumenta la atenuación de los rayos ionizantes al hormigón pesado, obteniendo una atenuación máxima de 96.32% cumpliendo una función óptima de blindaje radiológica debido a la reducción de la intensidad incidente aplicada al material, lo mismo sucedió para Guo, Zhu, Pan, Wu, y Zhang (2016), los resultados muestran que, bajo las condiciones adecuadas, el grado de cobre del concentrado de cobre más rugoso se incrementó de 6,43% a 11,04%, la recuperación de hierro de separación magnética se incrementó significativamente de 32,40% a 63,26%, y otros índices de evaluación se modificaron ligeramente, en comparación con el cobre no modificado escoria. En el presente estudio la atenuación de la intensidad del haz fue 93.28% cuando se le incorpora hasta un 50% de escoria de cobre.

CONCLUSIÓN

Los ensayos y pruebas variando la concentración de escoria de cobre como reemplazo de parte del agregado fino, dejan en evidencia que la densidad es directamente proporcional a dicha concentración, definiéndose que a partir del 50%EC a más se obtiene un hormigón de alta densidad estando el incremento en un rango de 7.07% a 11.9% respecto al hormigón patrón; valores que permiten obtener hormigones altamente densos. La resistencia a la compresión y tracción del hormigón aumenta cuando la dosificación de escoria de cobre se incrementa, llegando a sus máximos valores entre el 30%EC y 50%EC de concentración del mineral. En los ensayos de irradiación a las placas del hormigón se muestra una atenuación mayor respecto a la mezcla de hormigón patrón, teniéndose que a partir del 30%EC a más concentración la transmisión es menor al 7% lo cual representa valores de máxima atenuación en un rango de 93.020% hasta un 96.320% y que resultan recomendables como protección radiológica porque las características del hormigón lo identifican como altamente denso, muy resistente y capaz de atenuar la radiación. Estos resultados permiten determinar que

una concentración de 50%EC obtiene un valor de 2699.27 kg/m³ de densidad, una resistencia a la compresión de $f'_c=376.7$ kg/cm² y tracción $f'_t=30.13$ kg/cm², Además; la atenuación de la intensidad del haz 93.28% (tabla 2), que lo convierte en una dosificación óptima, homogénea y trabajable.

Limitaciones

El uso restringido del agregado de escoria de cobre de propiedad de la fundición de la empresa Inversiones FIMS E.I.R.L. Falta de instrumento del laboratorio como el equipo de medición de radiaciones. Reducida información bibliográfica sobre estudios de tecnología aplicado a hormigón pesado con materiales residuales proveniente de la actividad minera. Las normativas para el proceso de fabricación de placas de hormigón a escalas menores que permita la manipulación adecuada para los ensayos en el laboratorio. Disponibilidad de equipos y personal especializado en los ensayos de irradiación realizados en la sala de radiodiagnóstico del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN).

Recomendaciones

Realizar estudios con otros tipos de residuos minerales o metalúrgicos ya sea en forma granulada o cristalizada como son las escorias de cobre, baritina, plomo de ferróniquel, hierro, estaño, zinc, ferrocromo, entre otros residuos como reemplazo de una parte del agregado fino del diseño del hormigón, incorporando algún tipo de aditivo para optimizar la densidad, resistencia y atenuación de las radiaciones ionizantes en el hormigón para mejorar sus propiedades mecánicas. Utilizar ensayos de irradiación directa con intensidades mayores a las de radiodiagnóstico como son las de radioterapia que oscila en dosis cercanas a 2 Gy. Para ello se deberá realizar nuevos estudios de atenuación mediante el Half Value Layer (HVL), en donde se experimenten otros materiales con espesores mayores a los mostrados en el presente artículo, a fin de reducir la transmisión de radiaciones ionizantes y brindar una protección radiológica adecuada a las personas que frecuentan las áreas donde se presentan estas emisiones, porque la producción en gran escala de estos residuos minerales sin ser aprovechado, representan un impacto negativo al medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alayón Y. y Álvarez E. (2008). *Caracterización de mezclas de hormigón pesado elaboradas con mineral de hierro como agregado fino*. (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Álvarez, L. (2010) *Evaluación de la escoria de ferróniquel como agregado fino para hormigón*. (Tesis de pregrado). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Amaya, C. (2013). Operación de convertidores *peirce smith* y hornos de limpieza de escorias en la fundición de Ilo - Southern Perú, para optar el título profesional de ingeniero metalurgista y de materiales. Universidad Nacional del Centro del Perú- facultad de Ingeniería Metalúrgica y de materiales Huancayo- Perú.
- Calderón, E. (2019). “Determinación de parámetros característicos del haz de rayos x en radiodiagnóstico”, Implementación calidad RQR3. Momento, Jun 2019, no.58, p.89-102. ISSN 0121-4470.
- Cendoya, P. (2009). “Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón/ effect of smelting copper slag as fine aggregate on the resistant behavior of concrete”, *Ingeniare: Revista Chilena De Ingeniería*, 17(1), 85-94.
- EHE-08 (2008). *Instrucción de hormigón estructural - Propiedades tecnológicas de los materiales*. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio. Catálogo general de publicaciones oficiales: <http://www>.

fomento.es/. Ministerio de fomento.

- Gonzales, J. (2010). *Atenuación de los rayos x para diagnóstico empleando placas de hormigón normal y pesado con Baritina*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Guo, Z., Zhu, D., Pan, J., Wu, T., y Zhang, F. (2016). “Improving beneficiation of copper and iron from copper slag by modifying the molten copper slag”, *Metals*, 6(4), 86.
- Kiran, Z. y Autade, P. (2016). Effect of copper slag as a fine aggregate on properties of concrete. (Artículo) *International Research Journal of Engineering and Technology* (IRJET). Tamilnadu, India.
- Mavroulidou, M. (2017). “Mechanical properties and durability of concrete with water cooled copper slag aggregate”, *Waste and Biomass Valorization*, 8 (5), 1841- 1854.
- Miñano, A. y Patiño, A. (2015). *Elaboración de agregados con barita para el diseño de hormigóns de alta densidad que atenúen los rayos ionizantes*. (Tesis pregrado). Universidad San Martín de Porres, Lima.
- Murari, K., Siddique, R., y Jain, K. (2015). “Use of waste copper slag, a sustainable material”, *The Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(1), 13- 26.
- Pérez, S. (2004). *Hormigón Pesado en Base a Trozos de Acero Redondo*. (Tesis de pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Revuelta, D., Carballosa, P. y García-Calvo, J. L. (2015). *Eficacia de los criterios de identificación del hormigón en la normativa europea (EN 206) y la reglamentación española (EHE-08)*. *Informes de la Construcción*, 67(540): e126.
- Shen, Z., Zhang, Q., Cheng, W. y Chen, Q. (2019). “Radioactivity of five typical general industrial solid wastes and its influence in solid waste recycling. Minerals, 9(3), smelting copper slag as fine aggregate on the resistant behavior of concrete”, *Ingeniare: Revista Chilena De Ingeniería*, 17(1), 85-94.